

# Auf Straße und Schiene mobil – intermodale Verkehrssimulation mit SUMO

## By road and rail – intermodal traffic flow simulation with SUMO

Evamarie Wießner | Jakob Erdmann | Leander Flamm | Dr. Bärbel Jäger

**B**ei der Beantwortung komplexer Forschungsfragen oder der Bewertung neuer Technologien stoßen analytische Verfahren und kommerzielle Simulationswerkzeuge schnell an ihre Grenzen. Die freie und offene Verkehrssimulationsplattform SUMO (Simulation of Urban Mobility) kann diese Lücke schließen. Durch die Erweiterung der Open-Source Software von einer ursprünglich rein straßengebundenen Modellierung hin zu einer intermodalen Verkehrssimulation können Erkenntnisse aus den verschiedenen Verkehrsbranchen übertragen und vorhandene Synergien genutzt werden. Davon profitiert insbesondere der Schienenverkehr, da neue Konzepte nun auch verkehrsträgerübergreifend entwickelt und getestet werden können.

### 1 Ausgangslage

Mittels Verkehrssimulationen werden Bewegungen von und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern abgebildet. Sie werden insbesondere dann genutzt, wenn theoretische oder analytische Betrachtungen zu komplex werden und dynamisches Systemverhalten nicht mehr gut genug abbilden können. Aufgrund der Vielfältigkeit und Komplexität von Verkehrssituationen sind Simulatoren geeignete Werkzeuge, um Verkehrssysteme zu entwerfen, zu analysieren und zu bewerten sowie zu visualisieren. Ihre Bedeutung für die Verkehrsforschung und -praxis hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Einsatzgebiete für straßengebundene Verkehrssimulationen sind unter anderem die Stadt- und Verkehrsplanung, Stauforschung, Optimierung von Lichtsignalanlagenschaltungen und Tests der Car-2-X-Kommunikation. Bahnsimulationen werden ebenfalls als unterstützendes Werkzeug bei klein- und großräumigen Planungen eingesetzt. Dazu gehören Fragestellungen der Netzplanung, der Bewertung der Betriebsqualität, zur Optimierung des Energieverbrauchs, Dispositionsunterstützungen etc.

Bei der Beantwortung von Forschungsfragen, wie beispielsweise

- Welche Auswirkungen hat der Einsatz kleinerer Schienenfahrzeuge im dichten Takt durch den Einsatz des Fahrens im absoluten Bremswegabstand auf die Reisezeiten und die Verkehrsmittelwahl von Nutzern?
- Wie wirkt sich der Einsatz autonomer Fahrzeuge auf der Straße auf die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur und die Verkehrssicherheit aus?
- Wie hoch ist die Zuverlässigkeit von intermodalen Reiseketten im Störfall?

sind die Einsatzmöglichkeiten kommerzieller Simulationswerkzeuge begrenzt. Die freie und offene Verkehrssimulationssoftware

**A**nalytical methods and commercial simulation tools have been stretched to their limits when confronted with complex research questions or the evaluation of new technologies. The free SUMO (Simulation of Urban Mobility) open source traffic simulation platform has been designed to fill this gap. Its development from originally purely road-based modelling to intermodal traffic flow simulations means that knowledge from the different transportation sectors can be transferred and any existing synergies can be implemented. Rail traffic is especially expected to benefit, as new concepts can now be developed and tested across all modes of transport.

### 1 The current status

Traffic simulations allow the modelling of the movement and interaction between different traffic participants. They are particularly useful when theoretical or analytic approaches become too complex and are no longer able to produce sufficiently good dynamic system behaviour. When faced with various complex traffic situations, simulations are suitable tools for conceptualising, analysing and evaluating transportation systems. Another benefit of simulations lies in the possibility of visualising traffic scenarios. Their importance for transportation research and practice has steadily increased in recent years.

The fields of application for road-bound traffic simulations include urban and traffic planning, congestion research, the optimisation of traffic-light control and tests of Car-2-X communication. Rail simulations are also used to support small and large-scale planning. This includes network planning, evaluations of operation quality, the optimisation of energy consumption, designing rail hubs, support for disposition decisions etc.

The application of commercial simulation tools to answer research questions such as

- what will the effect on the travel time and the modal split be, if small rail vehicles are operated with absolute braking distance spacing?
- what will the impact of autonomous vehicles be on infrastructure capacity and traffic safety?
- how reliable are intermodal travel chains in the case of interruptions?

is limited. The free SUMO [1] open source traffic flow simulation suite helps to fill this gap. Amongst other things, it is capable of continuously modelling intermodal travel chains, it allows online access to simulations and it can be flexibly adapt-

SUMO [1] kann diese Lücke schließen. Sie ist unter anderem in der Lage, intermodale Reiseketten durchgängig abzubilden, ermöglicht einen Online-Zugriff auf Simulationen und ist bei Bedarf flexibel anpassbar. Während die Software ursprünglich als reine Straßenverkehrssimulation mit Fokus auf den motorisierten Individualverkehr konzipiert worden ist, können inzwischen nahezu alle Verkehrsmodi bodengebundener Transportsysteme abgebildet werden. SUMO kann daher einen wichtigen Beitrag dazu leisten, Modelle und Erkenntnisse aus der Straßenverkehrsmodellierung auf den Schienenverkehr zu übertragen.

## 2 SUMO – eine offene Simulationsplattform

SUMO ist eine mikroskopische, raumkontinuierliche und zeitdiskrete Verkehrssimulationsplattform. Sie hat den Anspruch, die Bewegung von Personen, Fahrzeugen und Gütern verkehrsträgerübergreifend zu modellieren. Dazu gehört die Simulation von Pkw, Lkw, Fußgängern und Zweirädern, mittlerweile aber auch des öffentlichen Personenverkehrs, der sowohl straßen- als auch schienengebunden stattfindet. Einzelne Knotenpunkte bis hin zu großräumigen, stadtweiten Szenarien können performant multi-modal simuliert und bei Bedarf auch dynamisch angepasst und beeinflusst werden. Für reine Bahnverkehrssimulationen sind auch größere Betrachtungsräume (z.B. Deutschland) technisch problemlos umsetzbar [2].

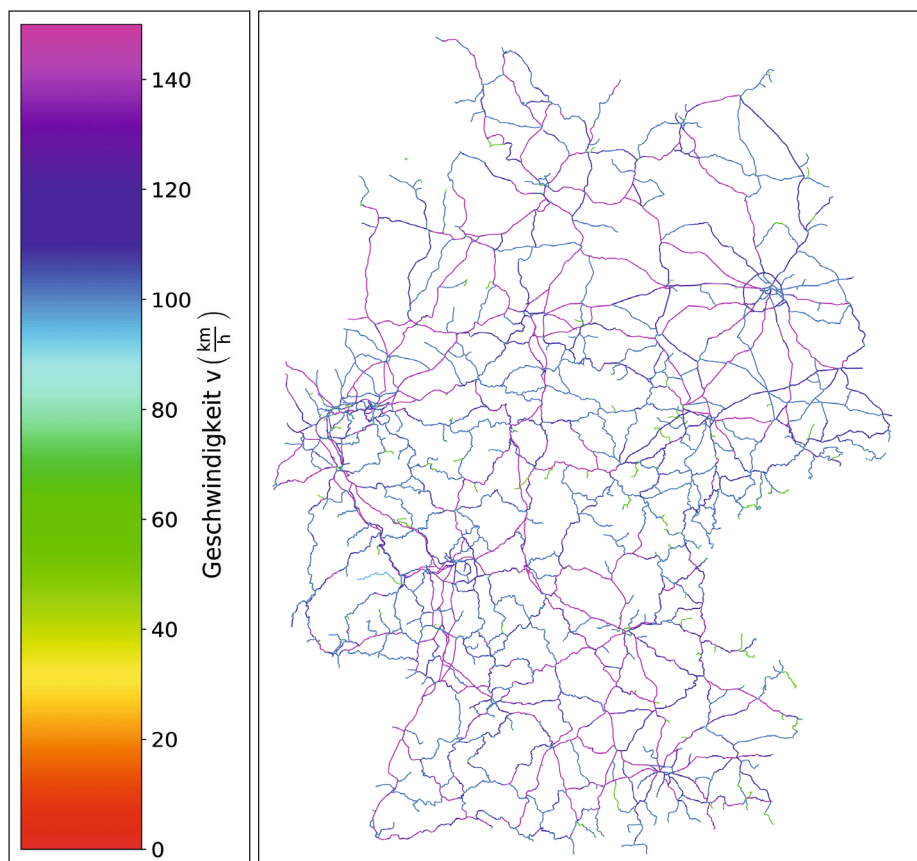
Die freie und offene Simulationssoftware hat den Vorteil, dass neue Verfahren und Konzepte einfach getestet werden können. Forscher und Entwicklerinnen müssen nicht länger eine eigene Verkehrssimulation aufsetzen, wenn die Potenziale kommerzieller Simulationswerkzeuge ausgeschöpft sind. SUMO kann durch

ed as needed. Whereas the software was originally conceived as a purely road-bound traffic simulation tool focusing on individual modes of motorised transport, nearly all ground-based transportation modes can now be modelled. SUMO is therefore making an important contribution to the transfer of models and knowledge from road traffic modelling to rail transport.

## 2 SUMO – an open simulation platform

SUMO is a microscopic, space-continuous and time-discrete traffic flow simulation platform. It aims to model the movement of people, vehicles and freight across different modes of transport. This includes the simulation of passenger cars, trucks, pedestrians and bikes as well as rail and road-bound public transport. Single junctions up to large-scale, city-wide scenarios can be simulated with high performance and they can be adapted and dynamically manipulated as required. Pure rail traffic simulations of bigger areas (i.e. Germany) are easily realisable as well [2].

The free and open source simulation software has the advantage that new algorithms and concepts can be easily tested. Researchers and developers no longer have to implement their own traffic simulation suites, if the potential of commercial simulation tools has been exhausted. SUMO can be extended with new modules at relatively low expense and can be made comparable to other models. Beyond that, the open source code facilitates cooperation between different institutions when developing a consolidated simulation platform. SUMO has therefore been licensed under the Eclipse Public License V2. Since 2001, its development has mainly been undertaken by the Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Centre (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) supported by several external parties. In 2017, the suite was downloaded more than 35000 times mainly in the US, China and India. In addition to pure traffic simulations, SUMO provides different tools for designing, implementing and evaluating the simulation of traffic scenarios. Those will be presented in the following section with a focus on rail simulations based on open data.



**Bild 1: Visualisierung des in SUMO importierten Schienenverkehrsnetzes gemäß INSPIRE der DB Netz AG**

Fig. 1: Import of a railway dataset provided by DB Netz AG (INSPIRE) as seen in the Simulation.

### 2.1 Network generation

The modelling of infrastructure is the basic prerequisite for every simulation. SUMO networks consist of edges representing tracks or streets and nodes representing switches, stations, stops or junctions. Edges are unidirectional connections between the nodes which contain different attributes such as geometry, speed limits and information about the vehicle classes which are allowed on them. The nodes contain information on their position and shape and the right-of-way rules, which may be overwritten by traffic-signal data. SUMO network graphs are saved in XML-files which include information about the edges, nodes, connections and the right-of-way rules. Route modelling using unidirectional edges is a typical approach to road traffic simulations. In order to be able to model bidirectional travel on single-track sections, two edges with precise-

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DLR /  
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten  
genehmigt von DVV Media Group, 2018.

eigene Module mit geringem Aufwand erweitert und auch mit anderen Modellen vergleichbar gemacht werden. Darüber hinaus erleichtert die freie Verfügbarkeit des Quellcodes auch eine institutionsübergreifende Zusammenarbeit mit dem Ziel der Entwicklung einer gemeinsamen Simulationsplattform. SUMO ist dafür unter der Eclipse Public License V2 lizenziert. Die Entwicklung wird seit 2001 durch das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), unterstützt durch mehrere externe Partner, getrieben. Im Jahr 2017 ist die Suite mehr als 35 000-mal heruntergeladen worden mit den Hauptzielländern USA, China und Indien.

Neben der reinen Verkehrssimulation bietet SUMO auch verschiedene Werkzeuge zur Erstellung, Durchführung und Bewertung der Simulation von Verkehrsszenarien. Diese werden im Folgenden mit dem Fokus auf Bahnsimulationen basierend auf offenen Daten vorgestellt.

## 2.1 Netzgenerierung

Basis für jede Simulation ist die Modellierung der Infrastruktur. SUMO-Netze bestehen aus Kanten, die Gleise oder Straßen repräsentieren, und Knoten als Abbild von Weichen, Bahnhöfen, Halte- und Knotenpunkten. Kanten sind unidirektionale Verbindungen zwischen Knoten, denen verschiedene Eigenschaften wie Geometrie, Höchstgeschwindigkeit und Informationen über die zugelassenen Fahrzeugtypen zugeordnet sind. Knoten beinhalten Informationen zu ihrer Position und Gestalt sowie Vorfahrtsregeln, die gegebenenfalls von Signalanlagen überschrieben werden. Die SUMO-Netzdateien liegen letztendlich als XML-Dateien vor, die Informationen zu den Kanten, Knoten, Verbindungen und Signalplänen beinhalten.

Die Modellierung von Strecken mittels unidirektionaler Kanten ist ein typischer Ansatz von Straßenverkehrssimulationen. Um die bidirektionale Befahrbarkeit insbesondere eingleisiger Schienenabschnitte abzubilden, werden in SUMO daher jeweils zwei Kanten, deren Geometrie genau invers ist, überlagert. Dabei wird jedoch sichergestellt, dass immer nur eine der beiden Kanten durch eine Zugfahrt belegt werden kann.

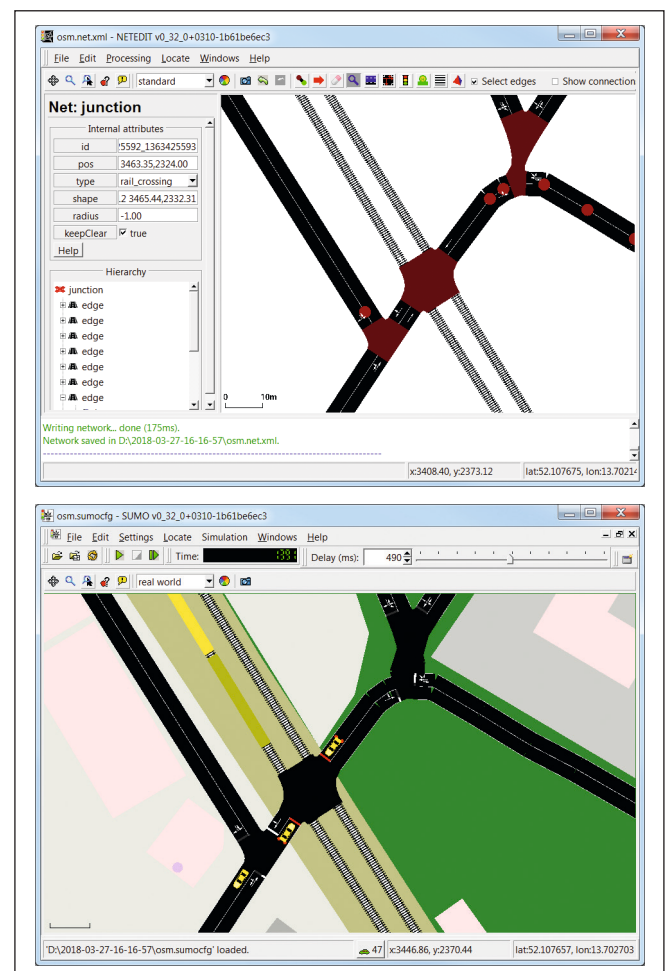
Neben der Schieneninfrastruktur ist die Leit- und Sicherungstechnik ein entscheidender Bestandteil des Bahnverkehrs, da dieser die Regelung und Sicherung der Zugfolge gewährleistet. Das Standardverfahren der Zugfolgesicherung ist im konventionellen Bahnbetrieb das Fahren im festen Raumabstand. In SUMO wird dieses mithilfe von Knoten des Typs „rail\_signal“ abgebildet, mit denen Strecken wie in der Realität in Blockabschnitte unterteilt werden können. So kann automatisiert sichergestellt werden, dass in jedem Block immer nur maximal eine Zugfahrt durchgeführt werden kann. Zusätzlich können mit diesem Knotentyp auch einfache Fahrstraßen abgebildet werden, indem ein Pfad zum Zielsignal gesucht und, bei Freisein der Strecke, das Signal auf Fahrt gestellt wird. Auch Bahnübergänge werden in SUMO als Knoten modelliert, welche die Belegung des zugehörigen Blockabschnitts überprüfen und die Fahrt für Straßenfahrzeuge entsprechend freigeben oder sperren.

Schienennetze können mittels der SUMO-Anwendung netedit manuell erzeugt oder mittels des Netzwerkimporters netconvert aus OSM (OpenStreetMap)-Daten konvertiert werden. Ein Ausbau der Importfunktionalitäten ist problemlos möglich, wie die große Zahl bereits unterstützter Eingabeformate (z.B. PTV Vissim, OpenDrive, MATSim) zeigt. Auch das frei verfügbare Schienenverkehrsnetz gemäß INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) der Deutschen Bahn AG [3] ist bereits prototypisch in SUMO importiert worden, wie Bild 1 zeigt. Insbesondere die Verwendung offener Daten, wie der OSM-Daten, erfordert jedoch häufig das manuelle Nachbearbeiten von Netzen. Auch dafür ist netedit ein geeignetes Werkzeug (Bild 2).

ly inverse geometry are overlaid in SUMO. At the same time, the simulation ensures that only one of these edges can be occupied by the passage of a train at any one time.

Control and safety systems are an important part of rail traffic in addition to the rail infrastructure, because they ensure safe train operations. Fixed block signalling is the standard train protection system used in conventional train operations. This is modelled using “rail signal” nodes in SUMO, so that the tracks can be divided into blocks as in reality. In this way, it is possible to automatically ensure that each block is occupied by only one train at a given time. Furthermore, this node type allows train routes to be modelled by setting the signal so that the train can advance, if the observed section is free. Railway crossings are also modelled as SUMO nodes, which check the related tracks and allow or block road vehicles from crossing.

Rail networks can be created manually with the help of the SUMO netedit application or they can be imported from OpenStreetMap (OSM) data via netconvert. The extension of the import functionalities is easily attainable as the large number of already supported import formats (i.e. PTV Vissim, OpenDrive and MATSim) shows. Even the freely available rail network according to INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) from Deutsche Bahn AG has already been imported prototypically, as can be seen in fig. 1. However, the use of open data as OSM data particularly



**Bild 2:** Bearbeitung von Netzelementen mittels netedit am Beispiel eines Bahnübergangs (oben) und Darstellung in der sumo-gui (unten)  
Fig. 2: Editing of a railway crossing using the netedit application (top) and a simulation on this network with sumo-gui (bottom)



## 2.2 Fahrzeuge und Linien

Ein weiterer zentraler Bestandteil einer Verkehrssimulation ist die Verkehrsnachfrage. In mikroskopischen Simulationen wird jedes Fahrzeug einzeln modelliert. Ihm werden jeweils fahrdynamische Eigenschaften, eine Abfahrtszeit und Route zugeordnet. In SUMO werden Fahrzeuge mittels Fahrzeugklassen und -typen charakterisiert. Schienenfahrzeuge können den SUMO-Fahrzeugklassen „rail“, „rail-electric“, „rail-urban“ bzw. „tram“ zugeordnet werden, über die insbesondere die zulässigen Kanten, in diesem Fall Schienenstrecken, definiert werden. Mittels der Definition des Fahrzeugtyps werden des Weiteren Eigenschaften wie die Fahrzeuglänge und Höchstgeschwindigkeit, aber auch der Zugtyp und das Fahrzeugfolgemodell festgelegt. Beispielhaft sind in SUMO bereits Zugkraft-Geschwindigkeitskurven bzw. Fahrzeugwiderstandskräfte für verschiedene Zugtypen (z.B. Güterzüge, Regionalzüge, Fernverkehrszüge) hinterlegt, um das Beschleunigungs- und Bremsverhalten von Schienenfahrzeugen möglichst realistisch abzubilden (Bild 3). Das Fahrzeugfolgemodell ist dabei ein Artefakt, welches ursprünglich aus dem Bereich der Straßenverkehrssimulation stammt und das Fahrverhalten der Fahrzeuge beschreibt. Die Abstandshalteverfahren Fahren auf Sicht bzw. Fahren im absoluten Bremswegabstand können auf diese Weise modelliert werden. Auch das Fahren im festen Blockabstand greift zur Zielbremsung auf Knotenpunkte vom Typ „rail\_signal“ auf das Fahrzeugfolgemodell zurück, wodurch auch ohne die Modellierung von Vorsignalen valide Fahrdynamiken erzeugt werden können. Zum detaillierten Vergleich unterschiedlicher Zugsicherungssysteme sind entsprechende Erweiterungen angedacht.

Als zusätzliche Funktion ist zudem geplant, Züge als Fahrzeuge mit mehreren Triebfahrzeugen und Waggons abzubilden. Dies ermöglicht eine detailgetreuere Abbildung der Fahrdynamik und ist sowohl für das Modellieren von Rangiervorgängen als auch von Fahrgastwechselvorgängen von Bedeutung.

Der Fahrtverlauf der definierten Fahrzeuge wird in SUMO mittels Routendateien festgelegt. Unter einer Route wird dabei die komplette Kantenliste zwischen Start und Ziel der Fahrzeugbewegung verstanden. Während die Routen des Individualverkehrs variabel sind und in SUMO beispielsweise mithilfe von Quelle-Ziel-Matrizen oder anderer Verkehrsdaten erzeugt werden, folgen Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs vorher festgelegten Linien mit Haltestellen bzw. Bahnhöfen und Haltepunkten. Diese können in SUMO manuell erstellt werden oder, soweit verfügbar, aus OSM-Daten oder anderen Quellen importiert werden. Mithilfe dieser Haltestellen- und Linieninformationen können schließlich Fahrpläne synthetisiert werden, indem Abfahrts- bzw. Taktzeiten vorgegeben werden. In der weiteren Entwicklung ist der Import von Fahrplandaten aus GTFS (General Transit Feed Specification) mit automatisierter Verortung auf verschiedenen Netzgrundlagen vorgesehen.

## 2.3 Simulation

SUMO ermöglicht eine zeitdiskrete Simulation mit einer voreingestellten Schrittweite von 1 Sekunde, die bei Bedarf auch bis zu einer Schrittweite von 1 Millisekunde heruntergesetzt werden kann. Die Simulation kann als Kommandozeilenanwendung auf einem Server in der Cloud oder mithilfe der graphischen Benutzeroberfläche sumo-gui (Bild 4) auf einem Desktop-Computer gestartet werden. Die Visualisierung von Verkehrsszenarien ist dabei vielfältig anpassbar und ermöglicht analog zur Kommandozeile verschiedene Möglichkeiten zur Interaktion. Mittels der Schnittstelle TraCI kann online in die Simulation eingegriffen werden. In Bahnszenarien ermöglicht dies beispielsweise die Modellierung spezieller Verhaltensweisen einzelner Fahrzeuge oder auch den Einbau von Störungen.

requires the manual editing of the networks. This can also be undertaken using netedit (fig. 2).

## 2.2 Vehicles and lines

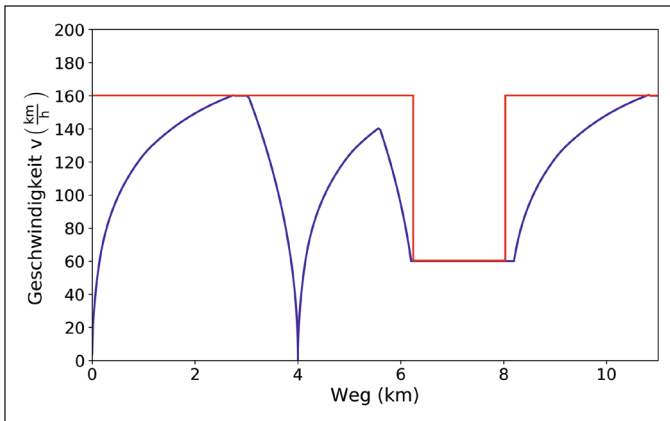
Traffic demand is another central part of every traffic simulation. Each vehicle is modelled individually in microscopic simulations. Dynamic attributes, a departure time and a route are assigned to the vehicle. The vehicles are characterised in SUMO using vehicle classes and types. Rail vehicles are included in the „rail“, „rail-electric“, „rail-urban“ or „tram“ SUMO vehicle classes which define the allowed edges or, in this case, tracks. Attributes such as vehicle length, the maximum speed limit and the train type and car-following model are determined using the vehicle types. SUMO provides some exemplary traction-speed curves and train resistances for different train types (i.e. freight trains, regional trains, high speed trains) in order to model the acceleration and braking behaviour of trains as realistically as possible (fig. 3). The car-following model is an artefact derived from road traffic simulations which describes the driving behaviour. Driving on sight or with absolute braking distance spacing can be modelled in this way. Driving with fixed blocks is also based on the car-following model in order to ensure accurate dynamics and precise stopping at the „rail signal“ nodes, even without pre-signals. Some software enhancements for comparing different train safety systems have been envisioned. The modelling of trains as vehicles with several traction vehicles and wagons is being planned as an additional feature. This will ensure more realistic driving dynamics and will be relevant for modelling shunting operations, as well as the boarding of passengers.

The SUMO routes for defined vehicles are defined using so-called route-files. A route is defined as a list of edges between the origin and destination of the vehicle. The individual traffic routes are variable and can be generated on the basis of origin-destination matrices or other traffic data, whereas public transport follows predefined lines with stops or stations and halts. These can be created manually or imported from OSM-files or other sources, if they are available. Timetables can be synthesised on the basis of the stopping and line information once the departure time and period has been pre-set. Furthermore, there are plans to import timetable data from the GTFS (General Transit Feed Specification) with automatic positioning on different networks.

## 2.3 Simulation

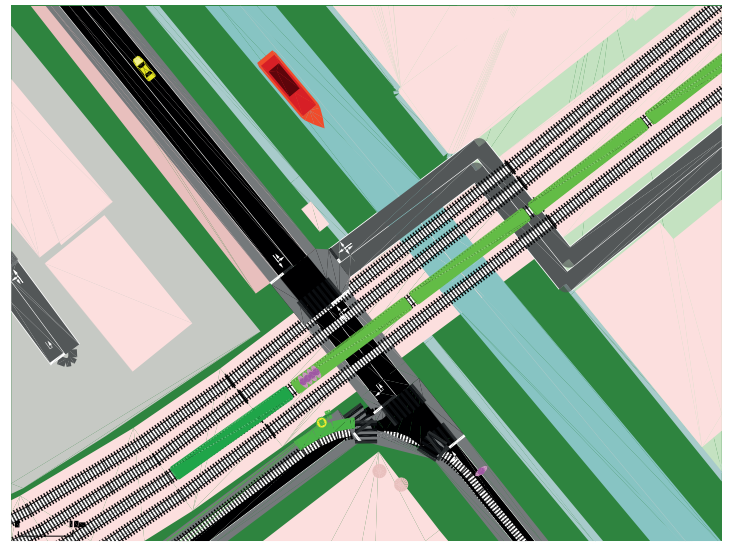
SUMO performs a time-discrete simulation with a preset step length of 1 second which can be reduced to 1 millisecond. The simulation can be started as a command line application on a server in the cloud or on a local computer using the sumo-gui graphical user interface (fig. 4). The visual representation of traffic scenarios is adjustable in various ways and, like the command line, it offers different possibilities for interacting with the simulation. TraCI API enables online interaction with the simulation via a socket connection and makes it possible to change nearly all its values. With regard to the rail scenarios, this allows the modelling of the special behaviour of single vehicles or the integration of interruptions, for example. The results of every run simulation can be saved in XML-files and further processed. In addition to the vehicle positions and delays, the number of passengers can also be analysed in every time step.

Unlike road traffic, rail traffic is continuously supervised by dispatchers who intervene in the case of any interruptions or potential conflicts. Modelling this complex process requires a new operational layer which is currently not part of SUMO. Since all vehicle movements are considered to be simultaneous and of equal



**Bild 3: Geschwindigkeitsprofil eines simulierten Personenzugs (blau) mit zugelassener Höchstgeschwindigkeit (rot). Das Profil wird durch einen Halt bei Kilometer 4, eine Langsamfahrstelle sowie die schwache Motorisierung des Zugs bestimmt.**

Fig. 3: Speed Profile of a simulated passenger train (blue) and track speed limit (red). The train stops at the 4km mark and passes a slow stretch after the 6 km mark. The long acceleration phase shows that the train is running at the limit of its engine power.



**Bild 4: Intermodale Simulation mit Schienen- und Straßenfahrzeugen sowie Passagieren und Fußgängern**

Fig. 4: Intermodal simulation with a train, road vehicles, passengers and pedestrians

Die Ergebnisse eines jeden Simulationslaufes können anschließend in XML-Dateien gespeichert und weiterverarbeitet werden. Neben Fahrzeugpositionen zu jedem Zeitschritt lassen sich so beispielsweise auch Verspätungen oder Fahrgastzahlen analysieren.

Im Gegensatz zum Straßenverkehr wird der Verkehr im Schienennetz durchgängig von Disponenten überwacht, die bei Störungen und potenziellen Konflikten steuernd in den Betrieb eingreifen. Die Abbildung dieser komplexen Steuerungslogik erfordert eine weitere Modellierungsebene, die aktuell noch kein Bestandteil von SUMO ist. Da hier alle Fahrzeugbewegungen nahezu gleichzeitig und gleichrangig betrachtet werden, kann von einer synchronen Simulation gesprochen werden. Mithilfe von TraCI ist die Abbildung von Dispositionsmaßnahmen in Reaktion auf den Verlauf eines Simulationslaufes oder in Abhängigkeit des Ranges eines Zuges jedoch problemlos möglich. Es ist daher denkbar, dass zukünftig auch Merkmale asynchroner Simulationsläufe in die SUMO-Simulationen integriert werden.

Auf der Grundlage der Modellierung verschiedener bodengebundener Fahrzeug-, Personen- oder auch Güterbewegungen können mit SUMO auch intermodale Simulationen durchgeführt werden. So können sich Personen durch ein Netz bewegen, indem sie laufen oder ein Fahrzeug benutzen und zwischen den verschiedenen Modi beliebig wechseln, sodass gesamte Wegeketten simuliert werden. Verschiedene SUMO-Werkzeuge unterstützen dabei das intermodale Routen und Umrouten aus Fahrzeug- oder Fahrgastsicht. Insbesondere zur Untersuchung integrierter Verkehrssysteme stellt dies einen deutlichen Mehrwert gegenüber anderen Simulationstools dar. Mit den Ergebnissen aus SUMO können die Auswirkungen neuer Schienenverkehrssysteme über die Systemgrenzen hinaus analysiert werden. Das eröffnet das Potenzial, weitere Stakeholder des Verkehrs in die Planung, Bewertung und Optimierung mit einzubeziehen.

### 3 Anwendungen

Im Rahmen von studentischen Arbeiten und institutionell geförderten Forschungsprojekten am DLR sind bereits erste intermodale Verkehrssimulationen durchgeführt worden, die die Einsatzpotenziale von SUMO zeigen. So ist die Simulationssuite u. a. genutzt worden, um die Betriebsqualität aus Sicht von Reisenden zu untersuchen [4]. Dafür sind anhand von drei ausgewählten Rei-

rank, the simulation is called synchronous. Thanks to TraCI, the modelling of dispatching activities in response to the run simulation or dependent on the train's rank is feasible. It is therefore imaginable that asynchronous simulation features can be integrated into SUMO simulations.

SUMO allows intermodal simulations based on the modelling of the movements of various ground vehicles, people or freight. People can move through a network as pedestrians or using a vehicle and they can arbitrarily change between the different modes of transport. Entire travel chains can be modelled in this way. Several SUMO tools support the intermodal routing and rerouting of vehicles and passengers. This creates added value with regard to the examination of intermodal transportation systems when compared with other simulation tools. The simulation results allow the analysis of the impact of new rail traffic systems outside existing system boundaries. This unlocks potential for integrating more stakeholders into planning, evaluating and optimising traffic.

### 3 Applications

Some intermodal simulations have already been conducted within the context of written studies and research projects at the DLR. To begin with, SUMO has been used to analyse the operational quality from the viewpoint of the travellers [4]. As such, one uninterrupted and several interrupted scenarios were modelled on the basis of three different journeys between Berlin, Bremerhaven, Hamburg and Frankfurt am Main. The result is the juxtaposition of the delay figures from the perspective of the traveller and the operator. In addition, the findings have also been used in the further development of the simulation tool. This especially involves the improvement of the network and timetable data imports.

The DLR's Optimode.net project is investigating passenger and air traffic in a multi-airport region by coupling several simulators, including SUMO, which model ground level vehicles such as passenger cars and public transport in the environment. The aim is to improve the integrated traffic management at the ground and air level by taking whole travel chains based on real data into account. The coupled simulations are already running

seketten zwischen Berlin, Bremerhaven, Hamburg und Frankfurt am Main ein störungsfreier Betrieb sowie mehrere gestörte Betriebsszenarien simuliert worden. Das Ergebnis ist die Gegenüberstellung der Verspätungskennzahlen aus Sicht der Reisenden und der Betreiber sowie Erkenntnisse, die in die Weiterentwicklung des Simulationswerkzeugs fließen werden. Dazu gehört insbesondere die Verbesserung des Netz- und Fahrplandatenimports. In dem Projekt Optimode.net ist SUMO genutzt worden, um bodengebundenen Verkehr zu modellieren und an verschiedene Simulatoren zu koppeln, die den Passagier- und Flugverkehr in einer Multi-Airport-Region abbilden. Ziel dieses Projekts ist die Verbesserung des Verkehrsmanagements durch die Berücksichtigung vollständiger Reiseketten unter Verwendung von realen Daten. Die Kopplungsfähigkeit der verschiedenen Simulationswerkzeuge ist anhand eines Basis Szenarios bereits gezeigt worden, weitere Untersuchungen sind geplant [5].

Ein weiterer Anwendungsfall für die Simulation von Schienenverkehr in SUMO ergibt sich aus dem Projekt Urbane Mobilität [6]. Im Rahmen dieses Projekts wird das intermodale Mobilitätsverhalten in Berlin für eine virtuelle Bevölkerung simuliert, wobei sowohl der Istzustand als auch Zukunftsszenarien untersucht werden. Als Teil dieser Simulation wird neben dem Straßenverkehr auch das Verkehrsangebot von Regionalbahn, S-Bahn, U-Bahn und Tram abgebildet. Bild 5 zeigt die Simulation des schienengebundenen Personenverkehrs als herausgelösten Teilaspekt der Gesamtsimulation aller Verkehrsmodi. Im Vergleich unterschiedlicher Person-Nachfrage-Szenarien zeigt sich bereits die Sensitivität der Reisezeit. Dabei ergab sich bei einem Szenario mit 3000 Fahrgästen/Stunde eine Medianreisezeit von 19 Minuten gegenüber einer Medianreisezeit von 25 Minuten bei 300 000 Fahrgästen/Stunde. Die genannten Zahlen verdeutlichen den simulierten Effekt von Fahrgastwechselzeiten und Fahrzeugkapazitäten, bedürfen jedoch weiterer Interpretation in Bezug auf die Realitätsnähe der unvollständig simulierten Sicherungsinfrastruktur.

#### 4 Ausblick

Ziel von Verkehrssimulationen ist es, Erkenntnisse über reale oder fiktive Verkehrssituationen zu erhalten, neue Verfahren und Konzepte zu analysieren und reproduzierbare Untersuchungen durch-

successfully, as has been shown using a basic scenario. Further examinations will be performed soon [5].

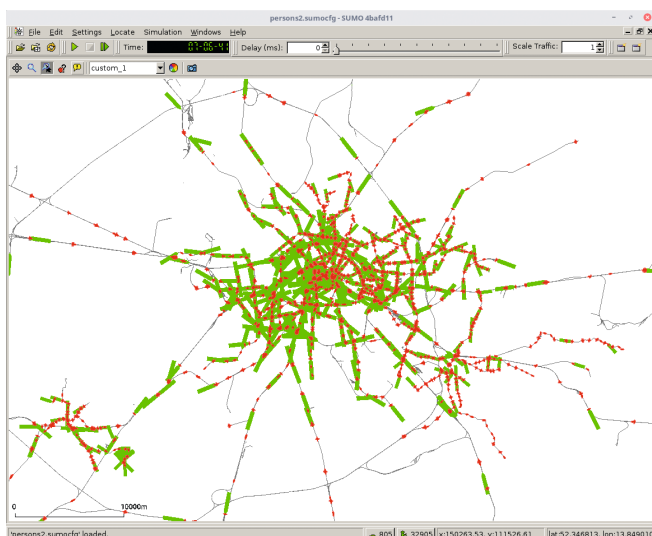
Another application for simulating rail traffic in SUMO involves part of the Urbane Mobilität project [6]. There, the intermodal mobility behaviour of the virtual population of Berlin is being modelled in order to investigate the actual situation as well as any future scenarios. Public transport such as trams, metros and urban and regional trains, as well as road traffic, form part of the simulation. Fig. 5 shows the simulation of the rail based public transport as a separate part of the whole intermodal simulation. The sensitivity of the travel time can be demonstrated by comparing scenarios with different levels of traffic demand. The median travel time in the scenario with 3000 passengers/hour is about 19 minutes, while a demand of 300 000 passengers/hour results in a 25 minutes median travel time. These numbers illustrate the simulated impact of passenger boarding and disembarking as well as the limited vehicle capacities. Nevertheless, any further interpretation must take into account the closeness to reality of the incomplete modelling of the rail infrastructure control and safety systems.

#### 4 Outlook

Traffic simulations help us to gain knowledge about real or fictional traffic situations, to analyse new concepts and to carry out reproducible studies. As an open and flexibly extensible platform, SUMO offers suitable tools for conducting simulations across different modes of transport. The required level of detail for the modelling and simulation of traffic scenarios depends on the posed research questions. Nevertheless, it is aimed at simplifying the reality with reasonable resources in order to obtain adequate and representative results.

Intermodal and forward-looking questions will be able to be better answered due to the transformation of SUMO from a purely road traffic simulation into an intermodal simulation tool. At the moment, driving in fixed blocks is the most commonly used method to ensure train safety. However, technological progress is foreseeable and driving with absolute braking distance spacing promoted by increased automation may soon be feasible. SUMO has already enabled the modelling of both operational processes and has helped in comparing them in order to analyse their impact. More research projects are being conducted with the implementation of even more simulation features in order to answer detailed train related questions. One of the aims is to model driving modes which allow flexible operations on single tracks, supervision and braking curves for current and future train protection systems, as well as the modelling of individual traction vehicles and wagons.

Despite these possible improvements, SUMO is already an important simulation platform which allows the acquisition of valid simulation results across different modes of transport regarding user behaviour and the impact of new operational concepts in rail passenger and freight services. ■



**Bild 5: Berliner Schienennetz mit S-Bahn-, U-Bahn-, Regionalbahn und Tramfahrzeugen (grün: Reisende, rot: Fahrzeuge)**

Fig. 5: Rail traffic in Berlin with urban rail, subway, interurban rail and tram (green: passengers, red: trains)

#### LITERATUR | LITERATURE

- [1] <https://github.com/eclipse/sumo>, 04.04.2018 um 10:00
- [2] Krajzewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M.; Bieker, L.: Recent development and applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5. Jg., Nr. 3&4/2012
- [3] <http://data.deutschebahn.com/dataset/data-streckennetz>, 27.03.2018 um 15:00
- [4] Hauck, R.: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Bewertung der Betriebsqualität – Key Performance Indicators aus Sicht der Reisenden, Bachelorarbeit, 2018



Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für DLR /  
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten  
genehmigt von DVV Media Group, 2018.

zuführen. SUMO ist eine geeignete Basis für verkehrsträgerübergreifende Simulationen, da es als offene Plattform je nach Anwendungsfall flexibel erweiterbar ist, um auch zukunftsgerichtete Fragestellungen besser untersuchen zu können.

So ist das Fahren im festen Raumabstand aktuell das am meisten benutzte Verfahren zur Zugfolgesicherung von Eisenbahnen. Technologische Weiterentwicklungen lassen jedoch absehen, dass im Zuge der Automatisierung zukünftig auch das Fahren im absoluten Bremswegabstand zur Anwendung kommen wird. SUMO ermöglicht bereits jetzt die Abbildung beider Abstandshalteverfahren und kann daher einen wichtigen Beitrag zum Vergleich dieser Verfahren und zur Analyse ihrer Auswirkungen leisten.

Um auch detailliertere eisenbahntechnische Fragen beantworten zu können, werden aktuell am DLR Forschungsprojekte zur Implementierung weitergehender Funktionalitäten durchgeführt. Zu den Zielen gehören unter anderem eine realitätstreue Abbildung von Fahrstraßen, die auch einen flexibleren Betrieb auf eingleisigen Strecken erlaubt, Überwachungs- und Bremskurven für momentan und zukünftig in Deutschland genutzte Zugsicherungssysteme, sowie die Modellierung von individuellen Triebfahrzeugen und Waggons.

Ungeachtet dieser Weiterentwicklungen stellt SUMO bereits jetzt eine wichtige Simulationsplattform dar, die im Kontext eines verkehrsträgerübergreifend betrachteten Verkehrssystems valide Ergebnisse zum Nutzerverhalten und zu den Auswirkungen neuartiger Betriebskonzepte im Schienengüter- und -personenverkehr liefern kann. ■

[5] Noyer, U.; Rudolph, F.; Jung, M.: Simulating a multi-airport region on different abstraction levels by coupling several simulations. SUMO User Conference 2018, 14.-16. Mai 2018, Berlin

[6] <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/urbane-mobilitaet>, 08.08.2018 um 14:00

#### AUTOREN | AUTHORS

##### Dipl.-Ing. Evamarie Wießner

Institut für Verkehrssystemtechnik, Gruppe Verkehrssimulation und -modellierung  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Anschrift/Address: Rutherfordstraße 2, D-12489 Berlin  
E-Mail: [evamarie.wiessner@dlr.de](mailto:evamarie.wiessner@dlr.de)

##### Dr. rer. nat. Jakob Erdmann

Institut für Verkehrssystemtechnik, Gruppe Verkehrssimulation und -modellierung  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Anschrift/Address: Rutherfordstraße 2, D-12489 Berlin  
E-Mail: [jakob.erdmann@dlr.de](mailto:jakob.erdmann@dlr.de)

##### Dipl.-Ing. Leander Flamm

Institut für Verkehrssystemtechnik, Gruppe Angebotsplanung und Betrieb  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Anschrift/Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [leander.flamm@dlr.de](mailto:leander.flamm@dlr.de)

##### Dr.-Ing. Bärbel Jäger

Institut für Verkehrssystemtechnik, Abteilungsleitung Bewertung des Verkehrs  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Anschrift/Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [baerbel.jaeger@dlr.de](mailto:baerbel.jaeger@dlr.de)

**We set priorities.**  
**Together for safety.**



**SCHALTBAU**  
PINTSCH BAMAG

[www.pintschbamag.de](http://www.pintschbamag.de)

**SCHALTBAU**  
PINTSCH ABEN

[www.pintschaben.com](http://www.pintschaben.com)

**SCHALTBAU**  
PINTSCH TIEFENBACH

[www.pintschtieffenbach.de](http://www.pintschtieffenbach.de)